

## 蚕の糸の可能性

石川県金沢泉丘高等学校理数科

荒木 琢矢 窪田 剛大 酒井 颯大 西尾 亮人 萬田 紘史

### 1. 要旨、概要

私たちは蚕に様々な物質を経口摂取させることによる蚕が作る糸の強度および伸縮性の変化を調べる実験を行った。

### 2. 研究動機、目的

私たちが注目したのは自然界の糸を作ることができる生物である。代表的なものに蜘蛛や蚕が思い浮かぶが、入手のしやすい蚕を用いて実験を行うこととした。先行研究『Silkworms Spin Super-Silk after eating Carbon Nanotubes』(2016) by Prachi Patel によると、蚕が人口物質で最高強度をもつと言われているカーボンナノチューブの水溶液を蚕の餌である桑の葉に吹きかけたところ、その桑の葉を食べた蚕が作った糸の強度が2倍になったという。私たちはこの先行研究に着目し、蚕に様々な物質を経口摂取させることによって蚕により強靱な(強度や伸縮性に優れている)糸を作らせることができると考え、実験を行うこととした。

また、蚕の糸の強度を上昇させる物質の発見と同時に、その強度上昇の原因を考察する。

### 3. 仮説

- ①糸に蚕が経口摂取した化学結合をもつ物質がそのまま取り込まれる
- ②食べた物質が影響して、糸の構成元素が

変化する

③糸の太さが太くなる

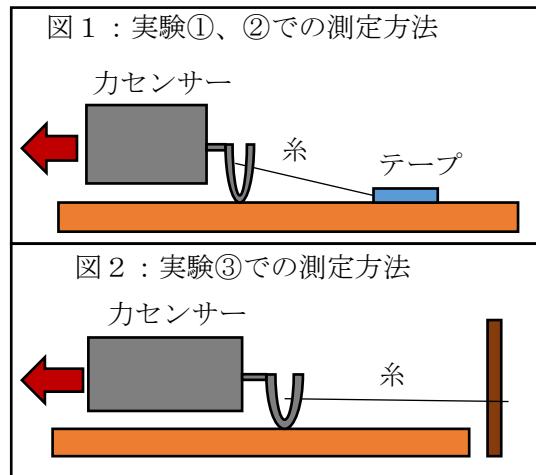
④餌を多く摂取することによって、蚕がより成長する。

これらを糸が強靱になる理由の仮説とし、実験を行った。

### 4. 実験方法・結果

＜強度・伸縮率の測定方法＞

プラスチック製のコップを用いて蚕の 30 周を 1 本の輪状にした後、実験 1, 2 では図 1 のように、糸の一端をテープで固定し、もう一端を力センサーにつなぎ、強度と伸縮性を測定した。実験 3 においては図 2 のように糸の一端をテープではなく円柱形の棒に巻き付けることによって固定した。強度は糸が切れる瞬間の張力(N)、伸縮率は引っ張った後の糸の長さ/引っ張る前の糸の長さ×100(%)と定義した。



## 〈実験の概要〉

### 【実験 1】

#### 《方法》

与えたい物質を水溶液(0.10wt%)にして人口餌 1.5g 当たり 0.4ml を餌に加えた。

蚕 35 匹を 5 匹ずつの 7 グループに分け異なる物質をそれぞれのグループの蚕に人工餌とともに与えた。また、対照実験を行うため、一つのグループには人工餌のみを与えた。与えた物質は以下のとおり。

黒鉛、塩化ナトリウム、水酸化ナトリウム、塩酸、二酸化チタン (TiO<sub>2</sub>)、片栗粉、  
(黒鉛と二酸化チタンは完全には水に溶けなかった。)

これらの物質を加えた意図を以下に示す。

#### ・黒鉛

先行研究を確かめるためにカーボンナノチューブを加えようとしたが、入手できなかったため、同素体である黒鉛を加えることにした。

#### ・塩化ナトリウム

餌の塩分濃度の違いが糸に影響を与えるかを調べるため。

#### ・二酸化チタン

本来、糸に含まれていないチタンを経口投与し、その蚕が作った糸を元素分析することで、食べた物質が糸に取り込まれているのかを調べるため。

#### ・水酸化ナトリウム、塩酸

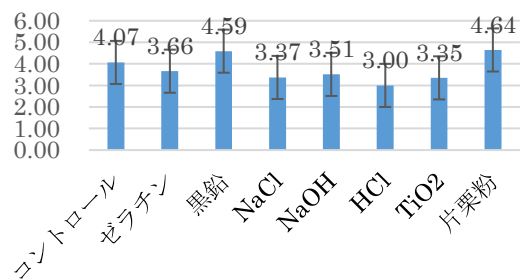
餌の pH の違いが糸に影響を与えるかを調べるため。

#### ・片栗粉

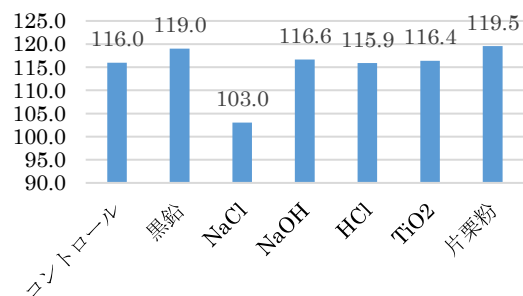
高分子である片栗粉を加えることで、餌に含まれるファンデルワールス力が糸に影響するかを調べるため。

## 《結果》

グラフ 1-1 : 強度の平均値(N)



グラフ 1-2 : 伸縮率の平均値(%)



#### ・強度について

コントロールと比較すると、強度の平均値には大きな上昇は見られなかった。

黒鉛と片栗粉においては多少の上昇(順に+0.52N、+0.57N)は見られたが、そのほかの物質においては、強度は減少していた。

#### ・伸縮率について

コントロールと比較すると、塩化ナトリウムのみが 13%低い値となったが、他の物質を摂取した蚕の糸は大きな差異が認められなかった。

#### 《補足》

先行研究と比較しても、濃度があまりに薄すぎたため、糸には影響が出なかったのだと考えられる。

## 【実験2】

### 《方法》

実験1と同様、蚕30匹を使用し5匹ずつの6グループに分け異なる物質をそれぞれのグループの蚕に人工餌とともに与えた。また、対照実験を行うため、一つのグループには人工餌のみを与えた。

人工餌12.5gあたり1.0gの物質を加えた。

与えた物質は以下の通り。

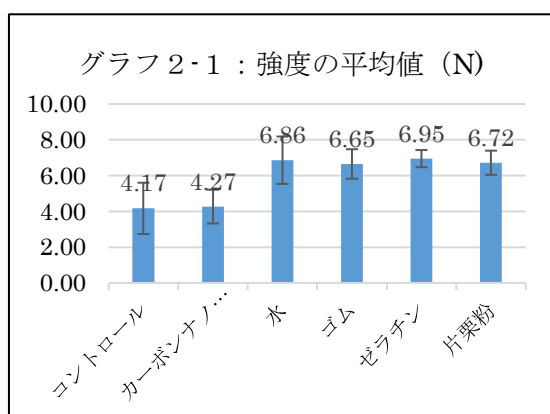
コントロール、カーボンナノチューブ、水、ゴム、ゼラチン、片栗粉

(水以外については固体のままを与えた。)

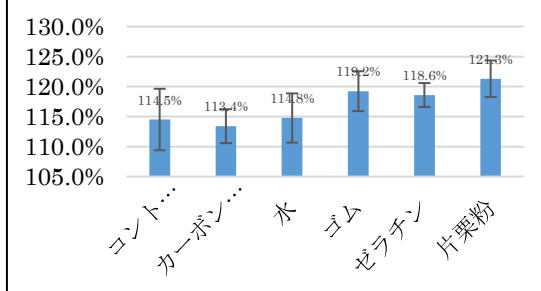
これらの物質を加えた意図を以下に示す。

- ・カーボンナノチューブ  
先行研究の信憑性を確かめるため。
- ・水  
餌に含まれる水素結合が糸に影響を与えるかを調べるため。
- ・ゴム、ゼラチン、片栗粉  
実験①の結果を踏まえ、高分子の物質が糸の強度を上昇させるのではないかと考え、高分子である上記の3つを加えた。

### 《結果》



グラフ2-2：伸縮率の平均値



#### ・強度について

水、ゴム、ゼラチン、片栗粉において上昇がみられた。コントロールの約1.5倍の強度になっていたことから、明らかに強度が上昇したといえる。

#### ・伸縮性について

ゴム、ゼラチン、片栗粉において上昇がみられた(順に+4.7%、+4.1%、+6.8%)。

## 【実験3】

### 《方法》

蚕22匹を使用し8グループ分け、異なる物質をそれぞれのグループの蚕に与えた。また、対照実験を行うため、一つのグループには人工餌のみを与えた。

人工餌の量は2回目と同じ量を炭酸カルシウム以外のグループに、炭酸カルシウムを与える蚕には人工餌を他のグループより多く与えた。与えた物質と各グループの蚕の数は以下の通りである。

コントロール	3匹
カーボンナノチューブ+水	3匹
カーボンナノチューブのみ	3匹
片栗粉	2匹
ケイ酸	3匹
水+ゼラチン+片栗粉	3匹
炭酸カルシウム	3匹
銅	2匹

これらの物質を加えた意図を以下に示す。

- カーボンナノチューブ

水を与える場合と与えない場合において、その強度に違いが見られるか確かめるために加えたが、カーボンナノチューブと水を与えた蚕はそのグループの蚕すべてが繭を作らなかったため、データが取れなかった。

- ケイ酸

高分子かつひも状の長い分子であるため、糸の構造を変化させる可能性を踏まえて加えた。

- 混合（水+ゼラチン+片栗粉）

これまでの実験により、水素結合また高いファンデルワールス力を持つ物質が糸を強くする可能性があったので、それらを混ぜ合わせることを検討した。

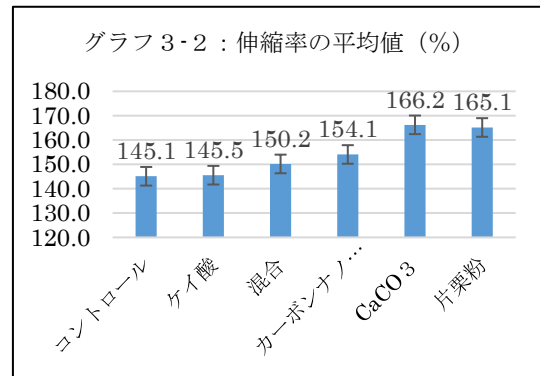
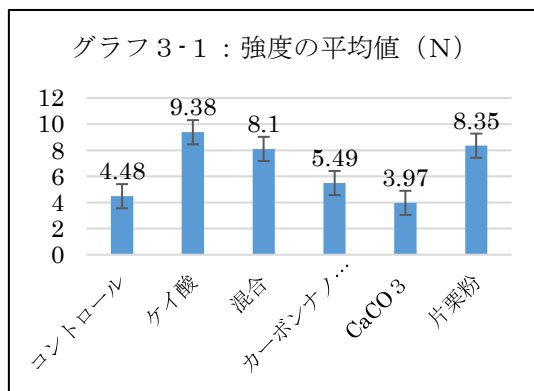
- 炭酸カルシウム

炭酸カルシウムは蚕の餌の摂取を促進するという先行研究があったため、餌をより多く食べさせることで、糸が強くなる可能性があったため、蚕に与えた。

- 銅

蚕が摂取した物質を含む糸を排出していることを元素分析によって証明するため、本来は糸に含まれるはずのない銅を与えた。

《結果》



- 強度に関して

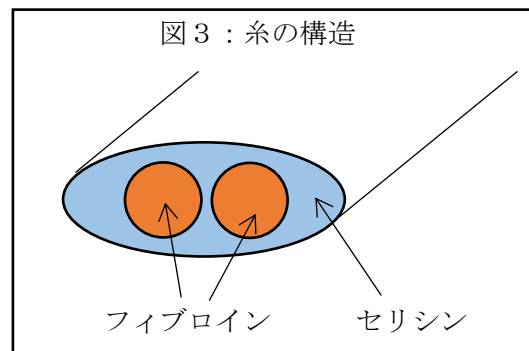
ケイ酸の強度がコントロールの二倍以上の値になった。片栗粉は実験 2 に引き続き大幅な強度の上昇(+3.67N)がみられた。混合（水+ゼラチン+片栗粉）では、強度は上昇した(+3.62N)が、片栗粉よりも伸びが小さかった。

カーボンナノチューブ（水なし）を与えた蚕が作った糸の強度は多少上昇した。炭酸カルシウムを与えた蚕が作った糸の強度は減少するという結果となった。餌の摂取量は増加していたが、強度の上昇は見られなかった。

- 伸縮性に関して

片栗粉の伸びが他に比べて明らかに大きい(+10.9%)。同様に片栗粉を含む混合、のグループも伸縮率が明らかに上昇した(+5.3%)。

他のグループでは伸縮性の上昇はほとんど見られなかった。



〈走査型電子顕微鏡での検査結果〉

実験①で得られたチタン、実験②で得られたコントロール、片栗粉、水、ゼラチンを経口摂取した蚕が作った糸を走査型電子顕微鏡で調べた。

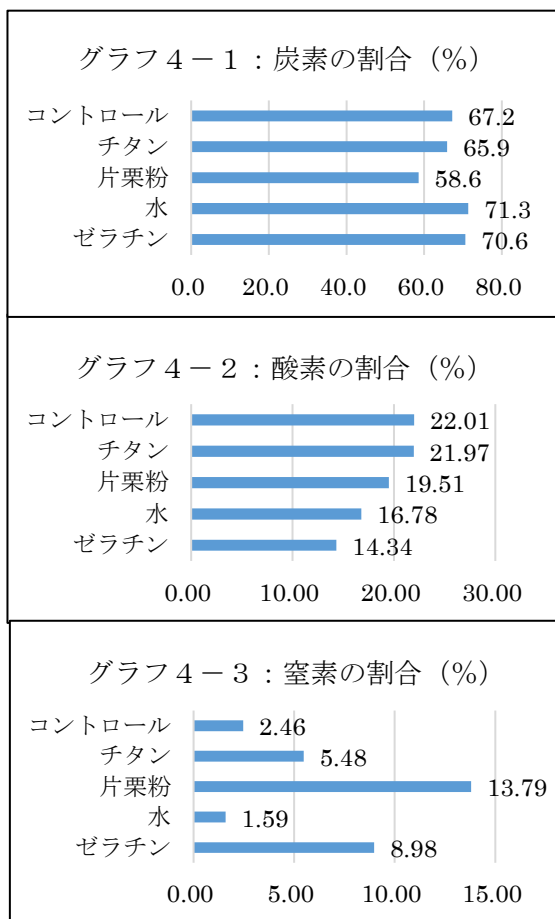
- ・元素割合について

〈方法〉

走査型電子顕微鏡を用い、元素分析を行った。

〈結果〉

調べた中で大きな差異が見られた炭素、酸素、窒素について比較したグラフを下に示す。



これらの元素の割合は上記のように大きな差が見られた。しかし、標準偏差があまりにも大きかったため、グラフで示すことができなかった。

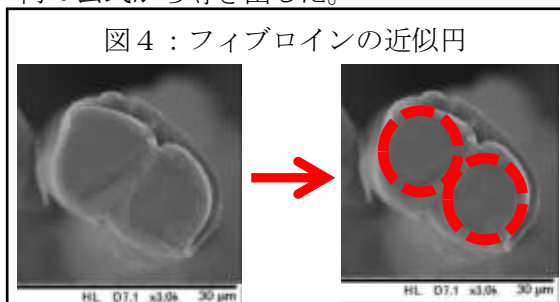
〈補足〉

糸の構造は図3に示す通り、フィブロイン2本とその周りを覆うセリシンでできており、楕円状の形をしている。この糸に電子を当て、元素分析を行ったので、断面に当たった場合はフィブロインの構成元素を調べられるが、側面に当たった場合はセリシンの構成元素を調べたことになる。グラフで示された差異はこのことによるかもしれないので、構成元素の割合が変化すると断定することはできない。元素割合が変化したかを明らかにするには検査を継続する必要がある。

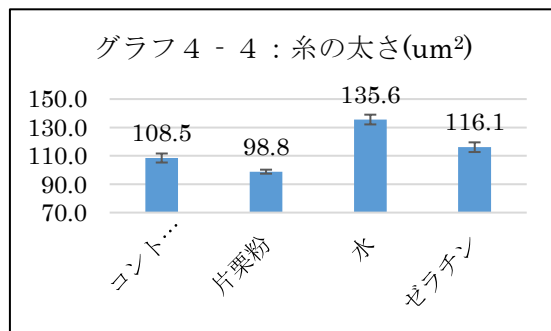
- ・糸の太さについて

〈方法〉

走査型電子顕微鏡で得られた画像を用いて、糸の太さを測定する。図3で示した通り、糸一本は、フィブロイン2本とその周りを覆うセリシンでできており、楕円状の形をしている。ここでは、糸の太さをフィブロイン1本の表面積とした。表面積は、図4のように近似円を書き、その直径を測ることによって、円の公式から導き出した。



〈結果〉



誤差範囲は大きいですが水を経口投与した蚕の作る糸は明らかに太さが増した(+27.1 $\mu\text{m}^2$ )。

## 5. 考察・結論

(仮説①について)

実験②、実験③の結果より、ファンデルワールス力、水素結合をもつ物質を食べた蚕の作る糸は実験②、実験③の結果より、強度が強くなった。しかし、走査型電子顕微鏡によって得られた画像から考えると、物質がそのまま取り込まれたとは考えにくい。このことから、物質が糸にそのまま取り込まれていないと考えられる。よって、化学結合をもった物質が糸に取り込まれて糸の性質が変化したわけではないといえる。

(仮説②について)

(走査型電子顕微鏡の検査結果)一元素分析について一の補足で述べた通り、今回の分析結果だけでは、どちらとも断言することが出来ない。明らかにするには、検査を継続する必要がある。

(仮説③について)

実験②の結果から、水を経口投与した蚕の作る糸は強度の大きな糸をつくった。また、(走査型電子顕微鏡の検査結果)一糸の太さについて - から水を多く摂取した蚕の糸は、より太い糸を作った。これらのことから、水を多く摂取した蚕はより太い糸を作ること、強靱な糸をつくったのだと考えられる。先行研究ではカーボンナノチューブ水溶液を摂取した蚕がつくる糸は約2倍の強度を有していたが、本研究の実験②、実験③でカーボンナノチューブ固体を摂取したとき、強度に変化が見られなかった。このような違いが生じたのは水を投与したか、していないかの違いであり、先行研究で糸の強度が増した

原因はカーボンナノチューブに起因するものではなく、水に起因するものだったと考えられる。

(仮説④について)

実験③の結果より、 $\text{CaCO}_3$  を摂取することで、人工餌の摂取量が増えた蚕の作った糸は、強度、伸縮性ともに変化が見られなかった。このことから、餌の摂取量は糸の性質に影響を与えないと考えられる。

## 6. 今後の展望

より多くの結果を集め、信憑性を高めることが必要である。また、強度、伸縮性が増したゴムやゼラチン、ケイ酸などの物質が糸にどう影響したかを確かめていくべきである。

## 7. 参考文献

- ・『Silk reinforced with graphene or carbon nanotubes spun by spiders』(2015)  
Nicol Pugno a professor in Trent University
- ・『Silkworms Spin Super-Silk after Eating Carbon Nanotubes and Graphene』  
(2016)Prachi Patel
- ・大日本蚕糸会
- ・『新・走査型電子顕微鏡』  
日本顕微鏡学会関東支部 編

## 8. 謝辞

北陸先端科学技術大学院大学

島原 秀登 助教 様

北日本紡績株式会社 様